

变频调速系统共模电流分析及其检测方法

侯世昌¹, 徐文静², 刘建军¹, 白志伟¹, 边 维¹

(1. 国网冀北电力有限公司 秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000;

2. 国网天津市电力公司 滨海供电分公司, 天津 300450)

摘 要: 变频调速系统中的复杂波形共模电流会影响传统电磁互感器的输出精度及线性度, 导致测量结果存在较大误差。针对此问题, 首先对系统共模电流的形成机理、流通路径与幅频特性进行分析; 然后提出一种结构简单、宽测量范围的磁调制电流互感器, 对互感器的检测原理进行了详细说明; 最后进行了样机设计和试验验证。结果表明, 所提出的磁调制互感器能够有效测量不同幅频特征的复杂波形电流信号, 满足变频调速系统共模电流的测量要求。

关键词: 变频调速系统; 共模电流; 磁调制; 复杂波形

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)09-0105-05

Analysis and Detection Method of Common Mode Current in Variable Frequency Speed Regulation System

HOU Shichang¹, XU Wenjing², LIU Jianjun¹, BAI Zhiwei¹, BIAN Wei¹

(1. Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd.,

Qinhuangdao 066000, China;

2. Binhai Power Supply Company, State Grid Tianjin Electric Power Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: The complex waveform common mode current in variable frequency speed regulation system could affect the output accuracy and linearity of classical electromagnetic current sensor, which could result in the measurement error. Aiming at solving this problem, firstly analysis the formation mechanism, flow path and amplitude-frequency characteristics of common mode current, and then a magnetic modulation current sensor with simple structure and wide measurement range was proposed. The detection principle was described in details, and prototype design and experimental verification were conducted. The results indicated that the proposed sensor could measure complex waveform current, which could fulfill the requirements of common mode current detection.

Key words: variable frequency speed regulation system; common mode current; magnetic modulation; complex waveform

0 引 言

现代工业中的调速系统已由原来的工频电源直接驱动控制发展为采用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术的功率变换器驱动控制, 即 PWM 变频调速系统。其系统控制性能虽然得到大幅度提升, 但是由于 PWM 技术的原因, 功率变换

器会输出高频共模电压, 同时系统中的散热器和电机内部存在大量对地寄生电容, 高频共模电压对寄生电容进行充放电形成高幅值、高频率的共模电流^[1-3]。系统中不同位置共模电流的幅频特性各不相同, 例如, 逆变器输出侧的共模电流为高幅值、高频率的复杂波形电流, 而逆变器直流输入侧的共模电流中包含较高直流分量。传统电磁互感器不能

作者简介: 侯世昌(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电机系统与电力系统继电保护。

徐文静(1985—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机系统。

刘建军(1985—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

检测直流电流,检测高频交流电流时其输出线性度和输出精度也会受到影响,所以,传统电磁互感器不能对系统中共模电流进行精确测量。

变频调速系统中的共模电流本质上是一种对地漏电流。现有的漏电流检测技术已经发展得比较成熟,图 1 为漏电流检测方法分类示意图。由图 1 可知,漏电流根据波形特征可分为工频交流漏电流、脉动直流漏电流和平滑直流漏电流,不同波形的漏电流采用的检测方法不尽相同。

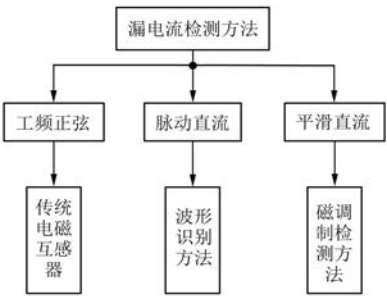


图 1 漏电流检测方法

对于工频正弦交流漏电流,主要采用传统电磁互感器进行检测。国内外学者的研究重点主要集中于提高漏电流互感器检测性能及新型漏电保护理论等方面^[4-6]。其中,河北工业大学的李奎教授针对传统漏电保护原理存在保护死区的问题,提出一种漏电流矢量变化量的新型检测方法,能够有效消除保护死区,提高漏电保护精度和可靠性。在脉动直流漏电流检测方面,国外相关技术的研究已经较为成熟,而国内在这方面的研究尚处于起步阶段^[7-8]。文献[7]根据典型脉动直流漏电流的波形特征,提出一种波形识别方法,并针对不同波形脉动直流漏电流设置各自的动作阈值,提高了保护精度。在平滑直流漏电流检测方面,国内外机构进行的相关研究较少,相关检测技术的要求较高,是当前的研究热点^[9]。文献[9]提出一种基于磁通门原理的漏电流检测方法,通过对互感器铁心施加交变激励磁电流产生交变磁场,对待检测的漏电流进行调制,然后对互感器输出信号进行解调并进行后续处理,能够实现直流漏电流的准确测量。

近年来,国内外学者提出了多种基于磁调制原理的电流互感器来满足不同应用场合的测量要求^[10-12]。文献[10]提出一种三磁心结构的磁调制电流互感器,主要用于大电流的测量,同时能够

降低功率损耗。文献[11]提出一种结构简单的磁调制电流互感器,调制频率能够随着磁心特性的改变进行自适应调节,扩大了适用范围。但是现有的磁调制互感器存在结构复杂或者电流测量范围小的问题,不能够直接应用于变频调速系统共模电流的测量。

本文在对变频调速系统共模电流幅频特性进行分析的基础上,提出一种结构简单、测量范围宽的新型磁调制电流互感器,对其结构组成及检测原理进行了详细说明,并进行样机研制和试验测试,验证了所提出的磁调制电流互感器的有效性。

1 系统共模电流分析

图 2 为典型的变频调速系统结构图。图 2 中,T 为变压器;L 为三相输入电感; U_{dc} 为直流母线电压; U_U 、 U_V 、 U_W 为逆变器输出的三相电压; n 为电机绕组中性点。

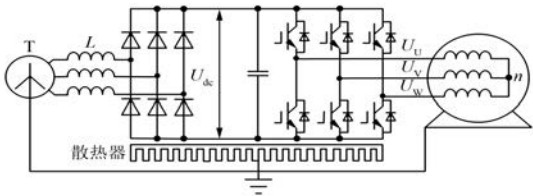


图 2 变频调速系统结构图

共模电压定义为

$$U_{cm} = \frac{U_{an} + U_{bn} + U_{cn}}{3}$$

(1)

系统运行过程中,逆变器输出不同电压矢量驱动电机运转,每个电压矢量对应的共模电压各不相同。如果系统采用两电平三相逆变器,能够直接输出的电压矢量为 8 个,各个电压矢量对应的三相电压与共模电压如表 1 所示。

表 1 电压矢量与对应的共模电压

电压矢量	U_{an}	U_{bn}	U_{cn}	U_{cm}
u_0	0	0	0	0
u_1	U_{dc}	0	0	$U_{dc}/3$
u_2	U_{dc}	U_{dc}	0	$2U_{dc}/3$
u_3	0	U_{dc}	0	$U_{dc}/3$
u_4	0	U_{dc}	U_{dc}	$2U_{dc}/3$
u_5	0	0	U_{dc}	$U_{dc}/3$
u_6	U_{dc}	0	U_{dc}	$2U_{dc}/3$
u_7	U_{dc}	U_{dc}	U_{dc}	U_{dc}

根据共模电流定义

$$i_{cm} = C \frac{dU_{cm}}{dt} \quad (2)$$

高频变化的共模电压对逆变器散热器寄生电容和电机内部寄生电容进行充放电形成高幅值、高频率的共模电流。

图3为系统共模电流流路径示意图。图3中, i_{GM} 为电机漏电流; i_{GH} 为散热器漏电流; i_{GT} 为流经变压器的漏电流; L_T 为变压器电感; C_{sf} 为电机定子绕组与外壳之间的寄生电容; R_s 为电机定子电阻; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为散热器和线缆寄生电容。

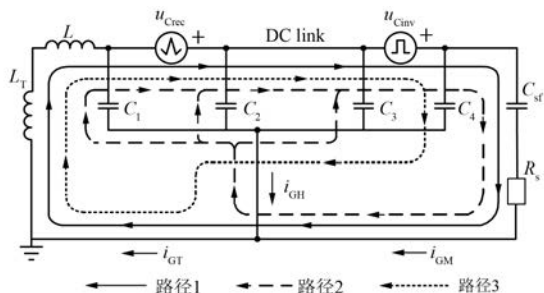


图3 共模电流流路径

从图3可以看出,系统共模电流主要流路径为三条,其一是功率变换器→电机→大地→变压器→功率变换器,其二是功率变换器→电机→大地→散热器→功率变换器,其三是功率变换器→散热器→大地→变压器→功率变换器。

图4为系统不同位置共模电流实测波形。由图4可以看出,系统不同位置共模电流的波形特征与幅频特性各不相同。其中整流器输入侧共模电流主要包含电网电压频率分量、电网电压三倍频分量和高频分量,直流侧共模电流主要包含直流分量和高频分量,逆变器输出侧低频分量较少,主要包含高频分量;而且各个位置共模电流幅值都比较高,会对传统电磁互感器的测量精度造成影响。

2 磁调制互感器检测原理

基于上文对变频调速系统共模电流的分析,本文提出一种结构简单、测量范围宽的磁调制电流互感器,结构框图如图5所示。互感器主要由脉冲电压源 S_1 、功率放大电路、磁心、激磁绕组 W1、检测绕组 W2、限流电阻 R_1 、采样电阻 R_2 和解调模块组成。

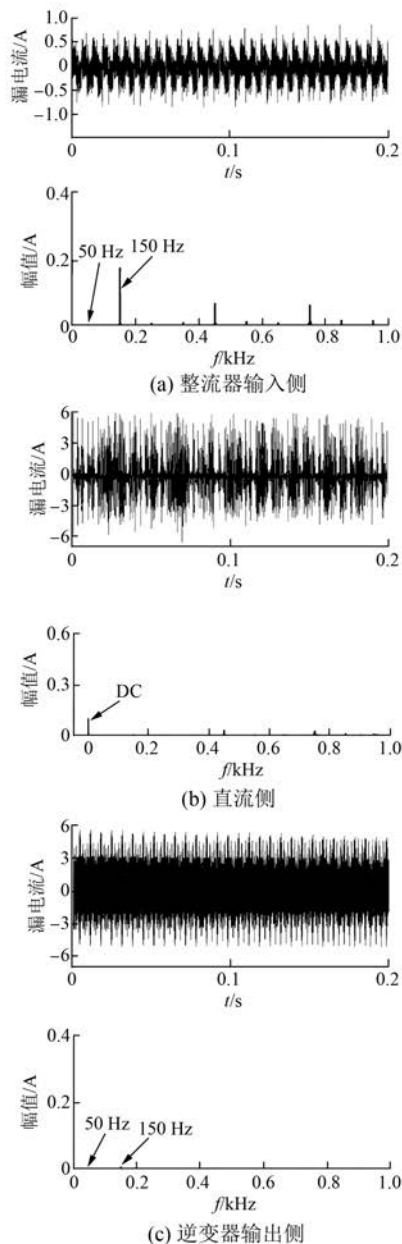


图4 变频调速系统共模电流波形

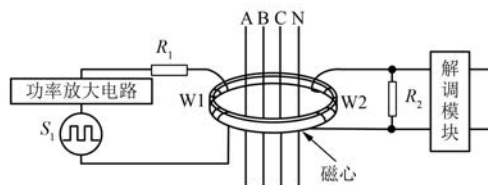


图5 磁调制电流互感器结构图

互感器正常工作时,脉冲电压源经过功率放大后在电阻 R_1 和绕组 W1 中形成激磁电流对磁

心进行激磁,磁心在正向饱和状态和负向饱和状态之间交替工作。当线路中存在待测电流时,高频激磁电流对待测电流进行调制,互感器检测绕组 W2 输出电流经过采样电阻 R_2 形成输出电压信号,通过解调模块中的滤波电路滤除与激磁电流频率相关的高频分量后,能够将与电流待测频率相关的低频分量提取出来,完成电流的测量。

图 6 为互感器磁心在有/无待测电流时的磁滞回线示意图。图 6 中, $\pm H_m$ 为激磁电流产生的最大磁场强度; H_s 为磁心的饱和磁场强度。当线路中无电流时,磁心的磁化曲线如图 6 中实线所示;当线路中有电流时,磁心的磁化曲线如图 6 中虚线所示。磁化曲线的变化会导致互感器二次侧输出电流波形的变化,如图 7 所示。

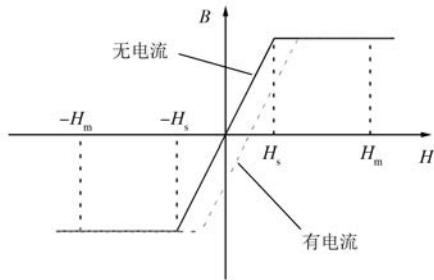


图 6 有/无电流时磁滞回线

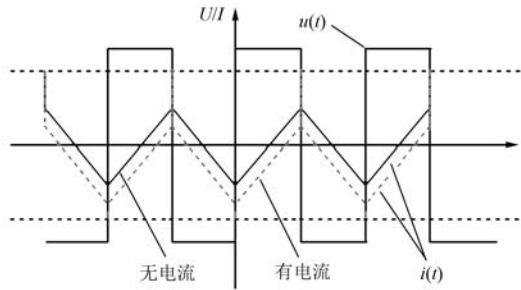


图 7 有/无电流时互感器二次侧输出电流

当待测电流为 0 时,互感器二次侧输出电压中只包含与激磁电流频率相关的高频分量;当待测电流不为 0 时,输出电压中不仅包含与激磁电流频率相关的高频分量,还包含与待测电流频率相关的低频分量。无论待测电流为直流电流还是交流电流,只要互感器激磁电流频率足够高,即能够对待测电流进行调制,经过后续解调后完成电流测量。

3 试验验证

本文研制了磁调制电流互感器样机进行测试,表 2 为互感器主要参数。单匝线圈最大激磁电流为 1 A,线圈匝数为 10 匝,即线圈最大激磁电流为 10 A,能够满足变频调速系统共模电流高幅值的测量要求。互感器样机调制频率为 4 kHz,可以根据实际需求进行调节,能够满足变频调速系统共模电流高频率的测量要求。

表 2 磁调制电流互感器主要参数

脉冲电压源 电压/V	调制频率/kHz	单匝最大激磁 电流/A	线圈匝数
± 12	4	1	10

图 8 为磁调制互感器激磁电压和激磁电流试验波形。从图 8 可以看出,激磁电压为脉冲方波,激磁电流随着激磁电压的变化发生相应变化。其中激磁电流的左右半周不对称是由于磁心的磁滞效应引起的,不会影响电流测量结果。

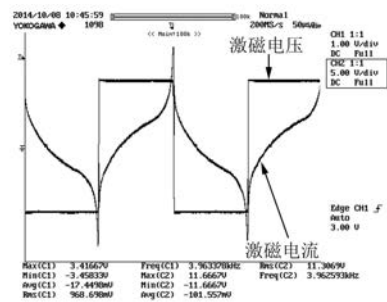


图 8 激磁电压和激磁电流试验结果

图 9 和图 10 分别为磁调制互感器对直流电流和 500 Hz 交流电流的测试结果。由图 9~图 10 可以看出,解调模块中的滤波电路能够有效滤除互感器输出电压中的高频分量,滤波后的低频分量与待测电流呈比例关系。

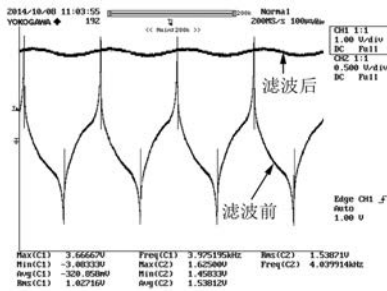


图 9 直流电流试验结果

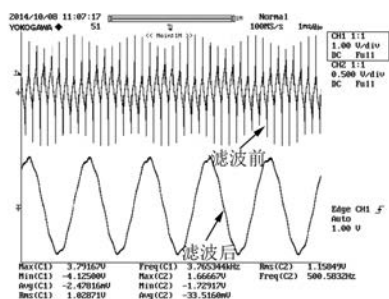


图 10 500 Hz 交流电流试验结果

经进一步试验测试,设计的磁调制互感器能够检测更高频率的复杂波形电流,满足系统共模电流测量要求。由于篇幅限制,本文不再给出相关试验结果。

4 结 语

变频调速系统中的高幅值、高频率共模电流会影响传统电磁互感器的测量准确度,针对这一问题,本文首先对系统共模电流进行了幅频特性分析,在此基础上提出一种结构简单、宽测量范围的磁调制电流互感器,对互感器检测原理进行了阐述,并设计了样机进行试验测试,结果表明互感器能够有效检测复杂波形电流,验证了本文提出的磁调制互感器的可行性。

【参考文献】

[1] AKAGI H, OE T. A specific filter for eliminating high-frequency leakage current from the grounded heat sink in a motor drive with an active front end [J]. IEEE Trans Power Electron, 2008, 23(2): 763-770.

[2] 姜艳姝,于晓洋,艾跃,等.PWM 多驱动系统中的共模电压及其抑制[J].电机与控制学报,2010,14(11): 44-48.

[3] 郭小强,魏宝泽,贾晓瑜,等.FB10 三相非隔离光伏并网逆变器共模电流抑制研究[J].电工技术学报,2015,30(8): 135-142.

[4] 武一,李奎,岳大为,等.消除剩余电流保护动作死区的理论与方法[J].电工技术学报,2008,23(6): 44-49.

[5] 李奎,陆俭国,武一,等.自适应漏电保护技术及其应用[J].电工技术学报,2008,23(10): 53-57.

[6] 韩晓慧,杜松怀,苏娟,等.基于局部均值分解的触电故障信号瞬时参数提取[J].农业工程学报,2015,31(17): 221-227.

[7] 张冠英.基于 A 型的剩余电流智能保护技术的研究[D].天津:河北工业大学,2011.

[8] 白龙温,牛峰,李奎,等.一种脉动直流剩余电流保护器[J].电测与仪表,2013,50(10): 106-110.

[9] 武一,李奎,王尧,等.磁调制式剩余电流传感器的动态励磁过程分析与仿真[J].电工技术学报,2014,29(7): 244-252.

[10] VELASCO Q G, ROMAAN L M, CONESA R A, et al. Design of a low-consumption fluxgate transducer for high-current measurement applications[J]. IEEE Sensor J, 2011, 11(2): 280-287.

[11] LI K, NIU F, WU Y, et al. Nonlinear current detection based on magnetic modulation technology [J]. IEEE Trans Magn, 2015, 51(11): 1.

[12] XU Z, MIN Y, DU F, et al. Type B RCD with a simplified magnetic modulation/demodulation method [C]// Proc IEEE 6th IPEMC, 2009: 769-772.

收稿日期: 2016-09-19

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部